

# 偏波によってビーム方向を変化させる リフレクトアレーアンテナの1層化の検討

瀧能 翔太<sup>†</sup> 重光 賛志郎<sup>†</sup> 皆森 勇甫<sup>†</sup> 牧野 滋<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 金沢工業大学 〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1

E-mail : <sup>†</sup> b1613265@planet.kanazawa-it.ac.jp,

**あらまし** 最近の研究ではリフレクトアレーアンテナ（以下、リフレクトアレー）特有の性質の1つである、VとH偏波を1枚の鏡面で共用することでより少ない鏡面構成のマルチビーム方式が提案されている。本研究では、従来の研究では2層構造で3本の線素子を用いていたのに対し、1層構造で3本の線素子でVとH偏波によって異なる方向にビームを放射するリフレクトアレーの検討を行った。結果、1層構造にすることで約20%の能率の改善に成功した。

**キーワード** リフレクトアレーアンテナ, 偏波, 1層構造

## A Dual-polarized Single Layer Reflectarray Antenna with changing beam-direction

Shota TAKINO<sup>†</sup> Sanshiro SHIGEMITSU<sup>†</sup> Yusuke KAIMORI<sup>†</sup> Shigeru MAKINO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Kanazawa Institute of Technology 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa, Japan

E-mail : <sup>†</sup> b1613265@planet.kanazawa-it.ac.jp, <sup>‡</sup> makino@neptune.kanazawa-it.ac.jp

**Abstract** Recent research has proposed a multi-beam system with fewer mirror configurations by sharing V and H polarized waves with one reflector, which is one of the unique properties of a reflectarray antenna. In this report, we investigate a reflectarray that radiates beams in different directions depending on the V and H polarization with three line elements in a single layer structure, in contrast to previous studies that used three line elements in a two-layer structure. As a result, we succeeded in improving the efficiency by about 20% by using a single layer structure.

**Key words** Reflectarray antenna, Polarization, Single layer structure

### 1. まえがき

リフレクトアレー [1] は金属板装荷FSR(Frequency Selective Reflector: 周波数選択鏡)が有する反射位相制御機能を反射鏡に適用したものである。その反射素子の形状や寸法を適切に選ぶことにより、一次放射器から放射された球面波の反射位相を制御して平面波を形成することができる。最近では成形ビームの他、複数のビームによってサービスエリアをカバーするマルチビームへの適用も検討されている。特に

マルチビームは、周波数によるビームシフト特性を用いてサービスエリアの Elevation 方向をスキャンするようにカバーし、さらに偏波によって Azimuth 方向にビーム方向を変化させることで従来と同等のサービスエリアのカバーを実現するマルチスキャニングビーム方式が提案されている。この方式は、上記のリフレクトアレー特有の2つの性質を適応することで、2枚の反射鏡でのサービスエリアのカバーを実現する。マルチスキャニングビーム方式以外にもVとH偏波を

1枚の反射鏡で制御することでより少ない鏡面の鏡面構成が検討されている[2]. 先行研究[3]では、2層構造で自由空間上においてグレーティングローブが伝播しない条件で素子間隔を  $0.499\lambda$  に設定し、鏡面設計をしたが、共振素子間隔が広すぎたことにより、グレーティングローブが伝播しサイドローブが高くなった. そこで、従来の検討[4]では共振素子間隔の検討を行い、誘電体内でグレーティングローブが伝播しない条件を新たに定義し、2層構造で素子間隔を  $0.373\lambda$  と先行研究の  $3/4$  倍の素子間隔にした素子を提案した. しかし、試作したアンテナは2層構造による電波の減衰によって、開口能率が低いことが課題となっている.

本報告では、従来の問題点である2層構造による電波の減衰を改善するために、1層構造での素子及びリフレクタレーを設計・試作し、測定値によって問題点改善の妥当性を示す.

## 2. 素子設計

### 2.1. 従来の素子設計モデル

先行研究の素子は、2層構造で自由空間上においてグレーティングローブが伝播しない条件である下式を用いて設計を行っている.

$$d < \frac{\lambda}{1 + \sin\theta}$$

上式より、 $d$  は共振素子間隔、である. また、 $\theta$  は入射角であり  $60[\text{deg}]$  を使用し、設計周波数は  $Ku$  帯のある周波数  $f_0'$  を使用している. 上式で求めた共振素子間隔は  $0.499\lambda$  の大きさとなる. しかし、この共振素子間隔で設計したリフレクタレーアンテナでは誘電体内のグレーティングローブ発生を考慮していないため低利得・高サイドローブ特性を示していた.

そこで、従来の検討では2層構造で誘電体内においてグレーティングローブが伝播しない条件である下式を用いて設計を行っている[4].

$$d < \frac{\lambda_d}{1 + \sin\theta_t}$$

上式の  $\theta_t$  は、入射角  $\theta$  に対する誘電体内の屈折角、 $\lambda_d$  は誘電体内の波長  $\lambda/\sqrt{\epsilon_r}$  である. 誘電体内の境界条件より、 $\sin\theta = \sqrt{\epsilon_r} \sin\theta_t$  であるため次式となる.

$$d < \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r} + \sin\theta}$$

その結果、素子間隔が約  $0.373\lambda$  となり、従来の研究と比べて素子間隔は  $3/4$  倍、面積は  $9/16$  倍と縮小され、その中で  $360[\text{deg}]$  の位相領域を満たし、独立した位相制御可能な素子を選択しなければならない. 図1に従来の素子イメージを示す.

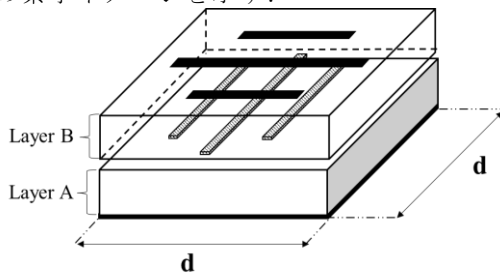
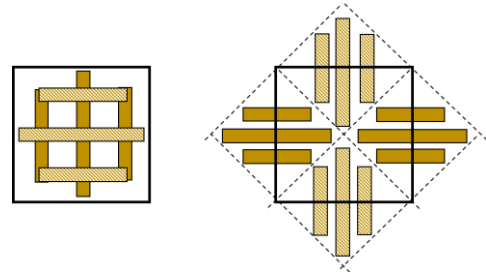


図1 従来の素子

### 2.2. 新素子設計モデル

昨年度の素子では、2層構造による電波の減衰、素子の反射損失によって、開口能率が低くなった. そこで、新素子では2層構造での問題点を1層構造にすることで問題点の改善を行った. 図2の(a)に従来の素子モデルイメージ、(b)に新素子モデルイメージ図を示す.



(a)従来素子 (b)新素子

図2 従来素子と新素子のイメージ図

図2より、(a)、(b)の黒の四角形は1つの素子のセルである. 従来の素子モデルは2つ偏波の素子を誘電体の層を隔てて配置していたため、従来研究の  $9/16$  倍の面積である  $0.373\lambda$  の面積内で要求条件を満たす素子を選択していたが、新素子では1層構造であるため、1つの層に対して2偏波分の素子を配置しなければならない. そこで、点線で囲まれている部分を1つの素子の領域として設定している. なお、新素子は周波数帯域を狭くしているため素子間隔は  $0.394\lambda$  を使用している. よって、先述した領域は面積で言うところ従来研究の  $3/10$  倍となる. この領域を超えた場合、両偏波の素子が干渉してしまい要求条件の1つである「両偏波が互いの反射位相に影響しないような、独立した位相制御を持つ」という条件を満たすことができない. 今回は、その領域内で  $360[\text{deg}]$  の反射位相をなるべく満たし、素子の反射損失が小さい素子の検討を行った. 図3に新素子の素子モデル、また素子の設計パラメータを表1に示す. 素子について今回は従来と同じ3本の線素子を使用し、中央の線とその両側の線が独立しており、中央の線  $l_{A1}$ ,  $l_{B1}$  を  $0.378\lambda$  まで伸ばしたのち、両側の線  $l_{A2}$ ,  $l_{B2}$  を  $0.199\lambda$  まで変化させることで位相制御を行っている.

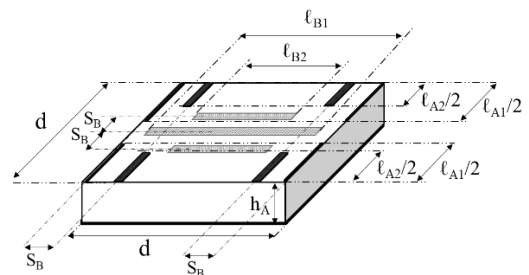


図3 新素子モデル

表 1 設計パラメータ

誘電体基板厚 $h_A$	0.127 $\lambda$
比誘電率 $\epsilon_r$	2.59
誘電正接 $\tan\delta$	0.0028
鏡面角度 $\theta_d$	25.0 [deg]
共振素子間隔 $d$	0.394 $\lambda$
総素子長 $\ell_A, \ell_B$	0.002~0.7768 $\lambda$
線幅 $w$	0.004 $\lambda$

### 2.3. 設計結果

H 偏波の素子長を  $\ell_B = 0.7768 \lambda$  に固定し、V 偏波の素子長  $\ell_A$  を  $0.004 \sim 0.7768 \lambda$  変化させたときの解析結果を図 4 に、V 偏波の素子の総素子長  $\ell_A$  を  $0.7768 \lambda$  にし、H 偏波の素子長  $\ell_B$  を  $0.004 \sim 0.7768 \lambda$  変化させたときの解析結果を図 5 に示す。図 4、図 5 より、総変化量が H 偏波は  $274[\text{deg}]$ 、V 偏波は  $271[\text{deg}]$  と両偏波とも  $360[\text{deg}]$  の反射位相領域を満たしていない。

しかし、今回選定した素子は素子間隔の  $1/3$  の間隔である  $0.13145 \lambda$ 、素子間隔の  $1/6$  の間隔である  $0.05776 \lambda$ 、素子間隔の  $1/4$  である  $0.8963 \lambda$  の 3 つのケースにおいて線幅  $S_B$  による反射損失が少ない素子及び理想的な位相分布と解析における位相分布の差の平均値である RMS 値が少ない素子を選定している。図 6、図 7 に各線同士の間隔  $S_B$  における両偏波の反射損失、図 8、図 9 に両偏波の RMS 値を示す。

図 6、図 7 より、3 ケースの線同士の間隔  $S_B$ 。また、図 8、図 9 より、RMS 値が低くなると理想的な位相分布に近づきます。その観点で図を見ると、 $S_B$  が  $0.08963 \lambda$  の時、反射損失が少なく、RMS 値が低い。よって、今回は  $S_B = 0.08963 \lambda$  を使用し、リフレクタレーの設計を行った。

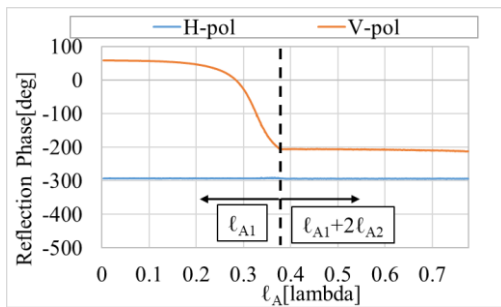


図 4 V 偏波の反射位相特性

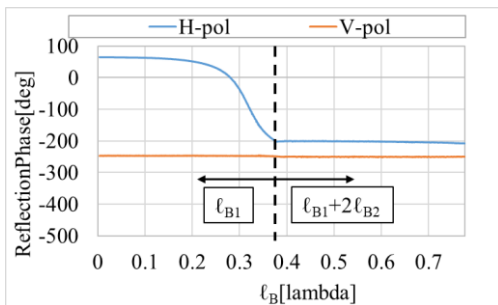


図 5 H 偏波の反射位相特性

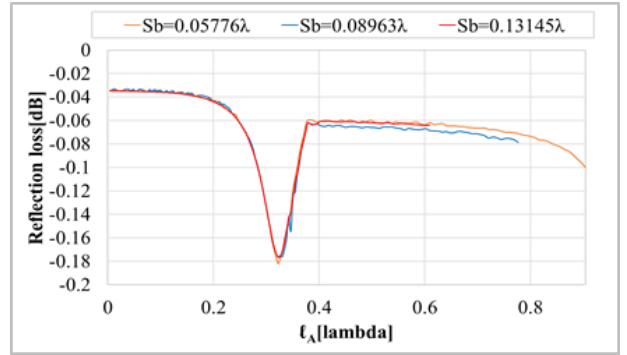


図 6 V 偏波素子の反射損失

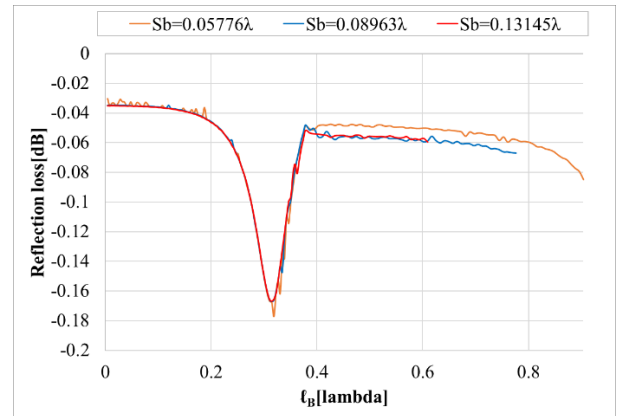


図 7 H 偏波の反射損失

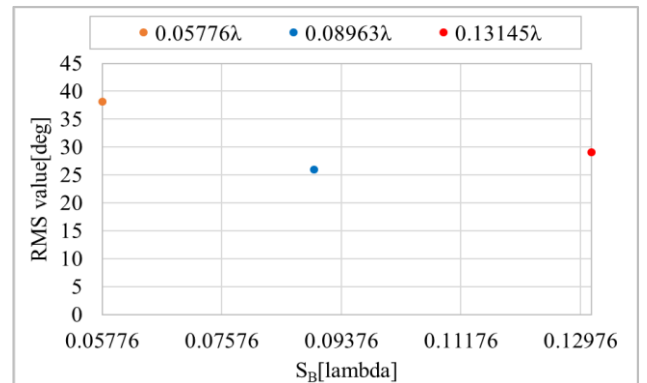


図 8 V 偏波の RMS 値

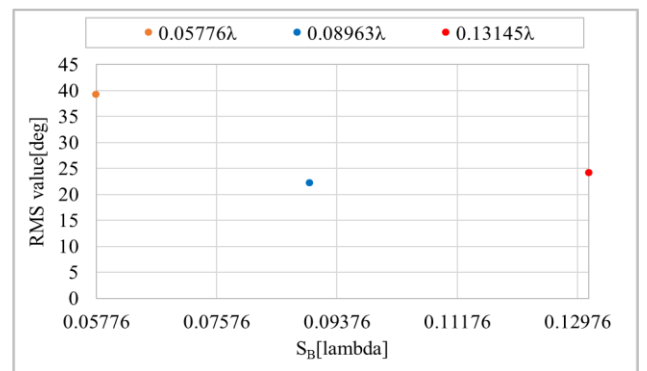


図 9 H 偏波の RMS 値

### 3. 解析結果

#### 3.1. 鏡面設計

素子を配列したリフレクタレーの鏡面の CAD 図を図 10 に示す。開口径は  $19.92\lambda$  である。図 10 の左に示す図が H 偏波の鏡面であり、右に示す図が V 偏波の鏡面である。図 10 の素子を 1 つの層に配置している。リフレクタレーの設計パラメータを表 2 に示す。ビーム方向は互いに約  $\sqrt{3}/2$  ビーム幅 (=  $3.04[\text{deg}]$ ) 離れるように設計した。

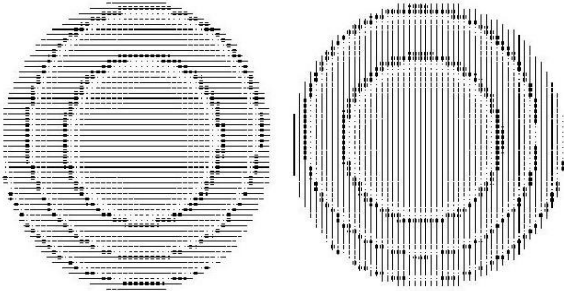


図 10 鏡面の CAD 図

表 2 リフレクタレーの設計パラメータ

鏡面の傾き $\theta[\text{deg}]$	25
ビーム角度 $[\text{deg}]$	$\pm 1.52$
共振素子間隔 $d$	$0.3944\lambda$
開口面の大きさ $D$	$19.92\lambda$
一次放射器から開口中心までの距離 $R$	$17.93\lambda$
クリアランス $c$	$3.77\lambda$

#### 3.2. 解析結果

設計したリフレクタレーを HFSS の LinkedField 機能を用いてフルウェーブ解析を行った。得られた Azimuth 面における設計周波数  $f_0$  の放射パターンを図 11 に示す。表 3 に各偏波のビーム方向と利得を示す。結果、H 偏波は Azimuth 面の  $+1.52[\text{deg}]$ 、V 偏波は  $-1.518[\text{deg}]$  方向と設計したビーム方向と概ね一致した。また、利得に関して従来の 2 層構造のリフレクタレーは H 偏波が  $32.46\text{dB}$ 、V 偏波が  $32.64\text{dB}$  だったのに対し、今回の 1 層構造のリフレクタレーでは H 偏波が  $33.76\text{dB}$ 、V 偏波の利得は  $33.86\text{dB}$  と従来の 2 層構造のリフレクタレーと比較して、 $1\text{dB}$  以上の利得の向上を実現した。

図 12、図 13 にそれぞれリフレクタレーの V 偏波と H 偏波の解析値による開口面分布、図 14 に Azimuth カット面の位相を示す。図 14 より、赤実線を H 偏波の解析値、赤点線を H 偏波の理論値、青実線を V 偏波の解析値、青点線を V 偏波の理論値としており、今回の線素子でのカット面の位相は概ね一致していることがわかる。

表 3 解析結果

偏波	ビーム方向 $[\text{deg}]$	利得 $[\text{dB}]$
V	-1.518	33.86
H	+1.52	33.76

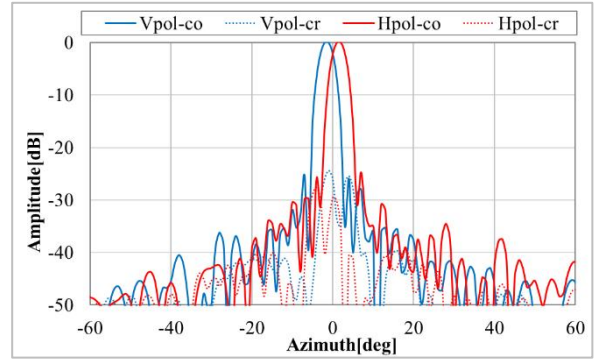


図 11 放射パターン (Azimuth 面)

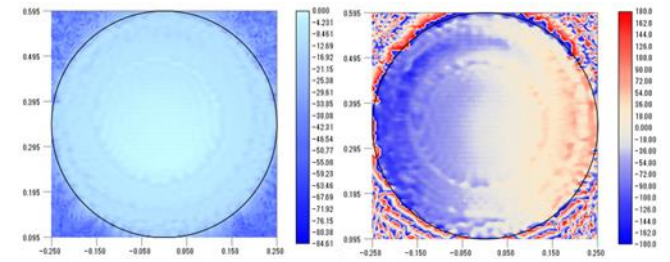


図 12 リフレクタレーの開口分布 (V 偏波解析値)

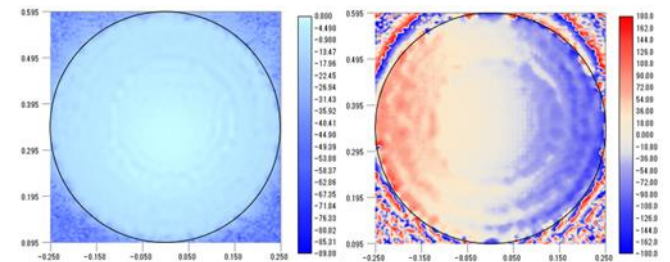


図 13 リフレクタレーの開口分布 (H 偏波解析値)

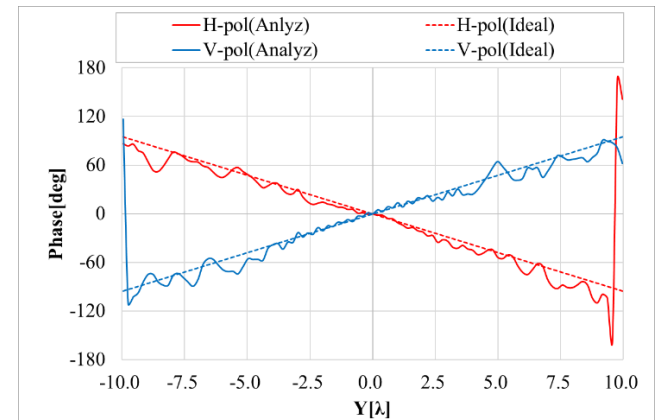


図 14 Azimuth カット面の位相

### 4. リフレクタレーの測定結果

#### 4.1 測定方法

図 15 にリフレクタレーの測定系を示す。二次元スキャナを用いて近傍界開口分布を測定した。さらに、測定した近傍界を遠方界に変換することで放射パターンおよび利得を求めた。

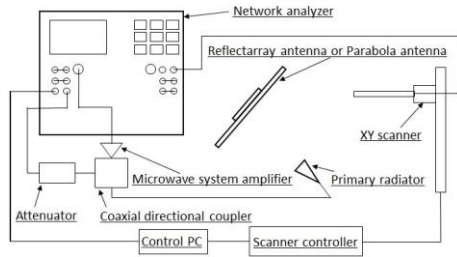


図 15 測定系

## 4.2 測定結果

図 16, 図 17, 図 18 に  $f_L \sim f_H$  の 3 周波の放射パターンの測定値を示す。

はじめに, 設計周波数  $f_0$  について性能を論じる。図 11 及び図 17 より, 解析値と測定値の放射パターンの傾向は似ており, ビーム方向は H 偏波が  $+1.46[\text{deg}]$ , V 偏波が  $-1.59[\text{deg}]$  方向にそれぞれビームを放射していることから, 解析値と測定値は概ね一致している。

次に, 周波数特性について述べる。図 16 から図 18 を比較したとき, 全体的にビーム形状は保たれている。また, ビーム方向に関しては, 下端の周波数  $f_L$  において H 偏波が  $+1.49[\text{deg}]$ , V 偏波は  $-1.65[\text{deg}]$  方向に, 上端の周波数  $f_H$  においては H 偏波が  $+1.40[\text{deg}]$ , V 偏波は  $-1.55[\text{deg}]$  方向にそれぞれビームを放射しており, 周波数特性を持っていることがわかる。また, 利得に関して測定機器の不備により絶対利得を測定することができず, 中心周波数  $f_0$  でのパラボラアンテナの指向性利得と新素子リフレクトアレーアンテナの指向性利得との比較を行った結果, H 偏波はパラボラが  $35.186[\text{dB}]$  に対してリフレクトアレーが  $34.941[\text{dB}]$  と差は  $0.245[\text{dB}]$ , V 偏波はパラボラが  $35.17[\text{dB}]$  に対してリフレクトアレーは  $34.976[\text{dB}]$  と差は  $0.194[\text{dB}]$  概ね差がないことがわかる。

図 19, 図 20 にそれぞれリフレクトアレーの H 偏波, V 偏波の測定値による開口面分布, 図 21 に Azimuth カット面の位相を示す。図 21 より, 赤実線を H 偏波の測定値, 赤点線を H 偏波の理論値, 青実線を V 偏波の測定値, 青点線を V 偏波の理論値としており, 今回の線素子でのカット面の位相は概ね一致していることがわかる。

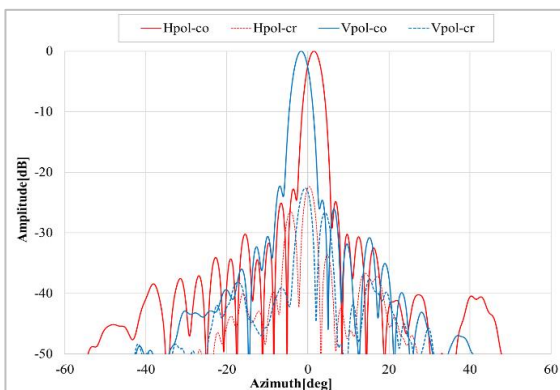


図 16 放射パターンの測定結果 ( $f_L$ )

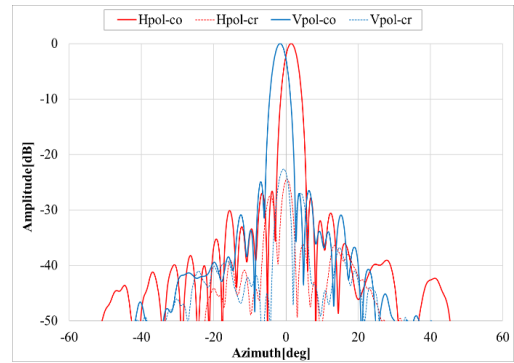


図 17 放射パターンの測定結果 ( $f_0$ )

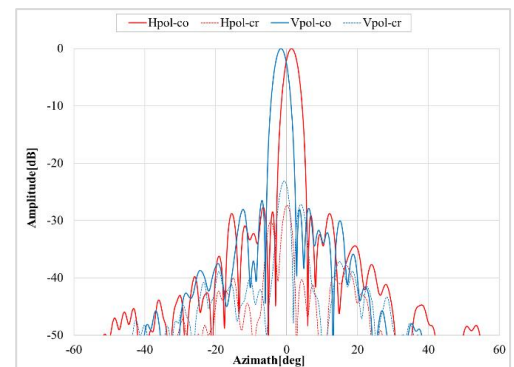


図 18 放射パターンの測定結果 ( $f_H$ )

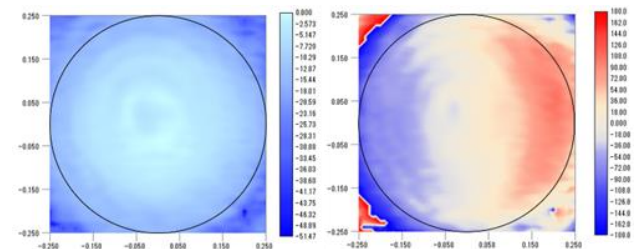


図 19 リフレクトアレーの開口面分布 (V 偏波測定値)

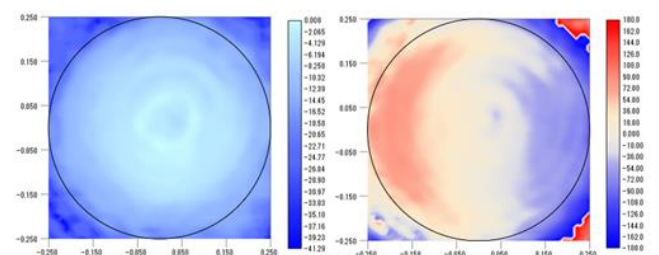


図 20 リフレクトアレーの開口面分布 (H 偏波測定値)

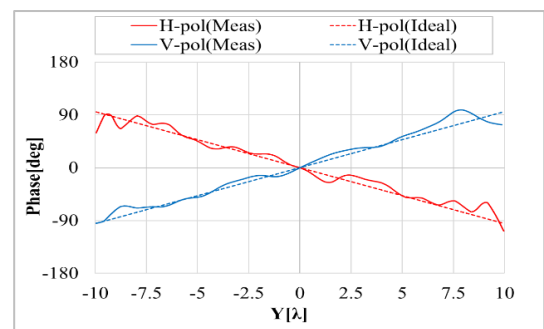


図 21 Azimuth カット面の位相

## 5. むすび

本報告では、偏波によってビーム方向を変化させるリフレクタレーの1層化を実現するための素子、線同士の間隔の検討及び、リフレクタレーに適用したときの測定結果を示した。結果、両偏波の素子を同層に配置することで360[deg]の反射位相領域を満たすことができなかったが、素子の反射損失及びRMS値の低いものを選択することで利得が向上し、また $f_L$ から $f_H$ の周波数帯域において能率が60%となり広帯域になるとわかった。これらの結果より、偏波によってビーム方向が異なるリフレクタレーの素子の設計条件である「各偏波360[deg]の反射位相領域をカバーする。」の条件の重要性が低くなり、素子設計の自由度が上がる事が考えられる。

今後は、360[deg]の反射位相領域を満たし、反射損失及びRMS値を考慮した1層の新たな素子を設計し、要求条件を満たすような素子の検討を行う。

本研究は、科研費JSPS(20K04491)の助成を受けたものである。

### 参 考 文 献

- [1] J.Huang, J.A.Encinar, "Rectarray antennas", Wiley, New Jersey, 2007.
- [2] 牧野 滋, 小幡 亮太, 竹島 健飛, 須永 諠, 瀧川 道夫, 中嶋 宏昌 "リフレクタレーを用いた衛星搭載アンテナ", 信学総体, B-1-51, 2018.
- [3] Rafael Florencio, " Reflectarray Antennas for Dual Polarization and Broadband Telecom Satellite Applications", IEEE AP, VOL.63, No.4, APRIL 2015.
- [4] 深谷 芽衣, 小幡 亮太, 牧野 滋, 瀧川 道夫, 中嶋 宏昌 "偏波によってビーム方向が異なるリフレクタレーアンテナの検討", 信学総体, B-1-82, 2019.
- [5] 藤井由香, 五十嵐勝俊, 牧野 滋, 廣田哲夫, 野口啓介, 伊東健治, " 高能率, 低サイドローブリフレクタレーアンテナ設計法", 信 学 技 報, AP2014-183, pp.127-132, 2015.